

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04326

研究課題名(和文) 鋼床版とSFRC舗装の接着剤接合部における劣化特性と耐久性評価に関する研究

研究課題名(英文) Degradation characteristics and durability evaluation of adhesive joints in SFRC overlay on orthotropic steel deck

研究代表者

村越 潤 (MURAKOSHI, JUN)

東京都立大学・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：60355881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：鋼床版の疲労対策技術である鋼繊維補強コンクリート(SFRC)舗装ではデッキプレートとの接合に接着剤を使用しているが、接着剤接合部の耐久性に関しては未解明な点が多い。本研究では、接着剤接合部を対象とした環境促進試験を行い、劣化要因である水と温度の同時作用に対する接合部の劣化特性と耐久性評価法について検討した。複数の性状の異なるエポキシ樹脂系接着剤を対象として、約1年間の温水浸漬等の環境負荷に対する接合部の強度及び破壊性状の経時変化を明らかにするとともに、環境促進試験を実施するうえでの試験条件・方法に関する留意点を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で扱うSFRC舗装では、鋼床版に接着剤を塗布した後、SFRCを打設し、流動状態のコンクリートをデッキプレートに接着させるという特殊な接合法を採用している。既に広く適用されているが、接着剤接合部の環境負荷に対する耐久性については未解明の点が多い。本研究成果は、SFRC舗装の実鋼床版橋への適用にあたって、接合部の耐久性評価・信頼性向上に資するものである。また、この接合法は機械的接合が不要で、デッキ面の不陸に追従可能という点で既設構造物での現場施工に適しており、鋼床版の疲労対策のみならず、複合構造化による補強など、新たな接合法として展開できる可能性を有している。

研究成果の概要(英文)： In steel fiber reinforced concrete (SFRC) overlay, which is an effective retrofit measure to prevent fatigue cracks in orthotropic steel decks, adhesive joints are used to connect SFRC to deck plate. The durability of the adhesive joints under environmental actions in service has not been completely clarified yet. In this research, focusing on three epoxy resin adhesives with different properties, accelerated degradation tests by water and thermal effects were conducted for test specimens of SFRC/steel adhesive joints. The deterioration tendencies of tension/shear strengths and fracture properties were clarified and the knowledge on testing and evaluation method for the durability performance was obtained.

研究分野：橋梁工学、鋼構造学

キーワード：鋼床版 SFRC舗装 接着接合 環境負荷 耐久性

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究では、鋼床版と鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 舗装との接着剤接合部に着目し、その劣化特性と長期耐久性を明らかにするものである。SFRC 舗装は、鋼床版と接着剤により一体化させることで、鋼床版溶接部の局部応力の大幅な低減を図る補強技術であり、溶接部において多数報告されている疲労損傷への対策工法として約 10 年前から実用化されている。最近では重交通路線に位置する鋼床版橋における疲労損傷の顕在化に伴い、広く適用されている。

SFRC 舗装を主とするコンクリート系舗装による鋼床版の補強技術に関しては、施工合理化・維持管理性の観点から、種々のコンクリート材料や接着剤等の接合仕様が提案されてきており、今後、より耐久性が高く、維持管理性に配慮した補強工法の実用化も期待される。一方、輪荷重が直接載荷する舗装においては、ひび割れは不可避であるが、ひび割れ発生後の水の浸入の影響も含めた実環境下での接着剤接合部の耐久性に関しては依然として不明な点が多い。接着接合の長期間の付着性能に関する信頼性を適切なレベルに確保して実構造に適用していくためには、汎用性のある耐久性評価の試験方法を提示することが必要と考える。

2. 研究の目的

本研究で扱う接着接合は現場施工に適用するものであり、鋼床版デッキプレート表面に接着剤を塗布した後、その上に SFRC を打設し、流動状態のコンクリートをデッキプレートに接着させるという特殊な接合方法である (図 1)。既に実用化されているものの、鋼床版上の 50~80mm 程度の厚さの舗装として過酷な条件下で使用されている。これまでの施工例でも舗装表面に乾燥収縮によるひび割れや輪荷重に伴う構造的なひび割れが報告されており、接合部の環境負荷特性に関して未解明の部分が残されている。

本研究では、1) 温度と水の作用をパラメータとした環境促進試験により、接着剤接合部の付着強度の劣化特性を明らかにすること、2) 環境促進試験の結果と、実環境での劣化傾向との関係を明らかにし、環境促進試験による接合部の経時的な強度低下の評価方法を提案することを目的としている。

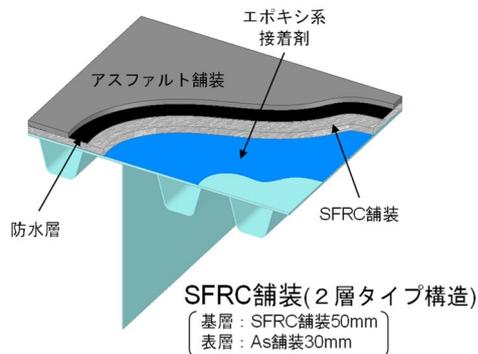


図 1 SFRC 舗装の構造例

3. 研究の方法

(1) 環境促進試験による接着剤接合部の強度特性

SFRC 舗装に使用されている、性状の異なる 3 種類のエポキシ樹脂系接着剤接合部を模擬した小型試験体を対象として、接着剤接合部の劣化特性について検討した。具体的には、小型試験体を、所定期間、温水浸漬させた後に、コア抜き引張試験を実施し、引張強度と破壊性状を評価指標として、約 1 年間の経時変化を分析するとともに、後述の暴露試験体の試験結果との比較を行い、環境促進試験における環境負荷条件と実環境作用との関係について考察した。

SFRC には、既設橋での交通規制下での施工を想定し、急速施工を前提とした超速硬セメントを使用した。表 1 に使用した 3 種類の接着剤の性能及び硬化後の材料特性を示す。接着剤 A は同舗装用の高耐久性の接着剤であり広く適用されている。接着剤 B は本工法導入初期に一部実橋で使用されていたが、現在では使用されていない。接着剤 C は未だ使用されていないが耐温水接着性を向上させた接着剤である。試験体は、文献 に従い、鋼板に接着剤を 1mm 厚で塗布し、75mm 厚の SFRC を打設することにより製作した。図 2 にコア抜き引張試験の概要を示す。試験体に所定径 100mm の切り込みを鋼板上面に達するまで入れ、恒温槽にて所定の環境負荷を与える。その後、載荷治具を設置し建研式接着力試験機を用いて、接合部が破壊するまで載荷し、荷重値をコア断面積で除し引張強度を算出した。環境負荷として、実橋での舗装内温度や水の浸入の影響を想定し、50 の温水浸漬を基本とし、20°C、70°C も実施した。恒温槽に一定期間 (56, 168, 364 日) 浸漬した。

表 1 接着剤の性能及び硬化後の材料特性

項目	(a) 接着剤 A		(b) 接着剤 B		(c) 接着剤 C	
	主剤	硬化剤	主剤	硬化剤	主剤	硬化剤
主成分	エポキシ樹脂	脂肪族ポリアミン	エポキシ樹脂	ポリチオール, 脂肪族ポリアミン	エポキシ樹脂	ポリアミン類
外観	白色ペースト状	青色液状	白色粘稠液状	淡黄色液状	黄色粘稠液状	青色液状
混合比	主剤:硬化剤 = 5:1 (質量比)		主剤:硬化剤 = 4:1 (質量比)		主剤:硬化剤 = 5:1 (質量比)	
硬化物比重	1.40±0.20 (JIS K 7112)		1.35±0.10 (JIS K 7112)		1.40±0.20 (JIS K 7112)	
圧縮強さ	50N/mm ² 以上 (JIS K 7181)		70N/mm ² 以上 (JIS K 7208)		50N/mm ² 以上 (JIS K 7181)	
圧縮弾性係数	1.0×10 ³ N/mm ² 以上 (JIS K 7181)		1.5×10 ³ N/mm ² 以上 (JIS K 7208)		1.0×10 ³ N/mm ² 以上 (JIS K 7181)	
曲げ強さ	35N/mm ² 以上 (JIS K 7171)		40N/mm ² 以上 (JIS K 7203)		35N/mm ² 以上 (JIS K 7171)	
引張せん断接着強さ	10N/mm ² 以上 (JIS K 6850)		10N/mm ² 以上 (JIS K 6850)		10N/mm ² 以上 (JIS K 6850)	

(注)メーカーの技術資料等をもとに作成した。印は廃止規格を表す。

また、接着剤 A, B については、別途小型試験体を製作し、一面せん断荷試験を行い、所定の負荷(50°C温水, 負荷期間 168 日)を与えた後、コア抜き引張試験と同様に接合部のせん断疲労強度及び破壊性状を分析した。

(2) 実環境暴露試験体の接着剤接合部の経年劣化傾向

屋外に 3 年間、室内に 10 年間保管された SFRC 舗装を敷設した鋼床版試験体(以下、暴露試験体)を対象として、接着剤接合部(接着剤 A を使用)の引張強度及び破壊性状の経年劣化状況を調査した。温度履歴(鋼板下面)は屋外暴露時では-7°C~30°C, 屋内保管時では 12°C~27°C である。試験時の温度をパラメータとし、3 ケース(-10°C, 20°C, 50°C)でコア抜き引張試験を実施した。常温 20°C 時に関しては、さらに試験時における接合部への水分の浸入が破壊性状に与える影響を確認するため、切り込みを導入し所定の環境負荷を与えた後にコア抜き引張試験を実施した。負荷条件は、1) 温冷繰返し(-10°C 気中 6 時間, 50°C 気中 6 時間を 1 サイクルとし、85 日間実施)、2) 20°C 水中浸漬(56 日間)、3) 50°C 温水浸漬(56 日間)の 3 パターンである。

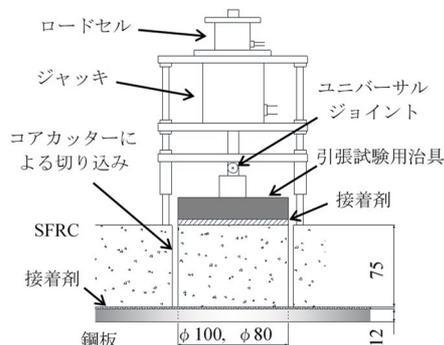


図 2 コア抜き引張試験の概要

(3) 環境促進試験による接着剤の強度・材料特性

接着剤接合部におけるコンクリートと接着剤との混合部の存在を踏まえ、アルカリ温水浸漬等が引張せん断接着強度(JIS K 6850 による)及び圧縮強度(JSCE-K 541-2018 による)に与える影響について検討した。また、環境負荷に伴う接着剤単体の強度・材料物性変化の調査と、接着剤成分の赤外線分光分析を実施し、接着剤としての強度低下や化学的な劣化傾向を分析した。

4. 研究成果

環境負荷後の強度試験として、コア抜き引張強度とせん断強度に着目したが、以下では暴露試験体の試験結果と直接比較分析を行ったコア抜き引張試験の検討結果を中心に説明する。また、環境促進試験結果を基に温度負荷と強度低下との相関性を分析し、アレニウス則に基づく温度影響をパラメータとした予測手法の適用性について検討したが、温度依存性は明確でなかったこと、また、破壊性状が複雑であり、予測手法の適用が難しいと考えられた。そこで本研究では、強度と破壊性状を指標として、環境促進試験体と暴露試験体の劣化特性の比較分析を行った。

(1) 環境促進試験による接着剤接合部の変化傾向

接着剤 A について、図 3、図 4 に、負荷 50°C での環境負荷期間と引張強度、界面破壊割合の関係を示す。破壊性状の変化を劣化の一指標と考え、破壊の生じた位置から界面破壊(接着剤と鋼板の界面で破壊)、凝集破壊(接着層内で破壊)、材料破壊(SFRC 内で破壊)の 3 種類に分類し、界面破壊面積割合に応じて接着性能の信頼性が低下しているものとした。

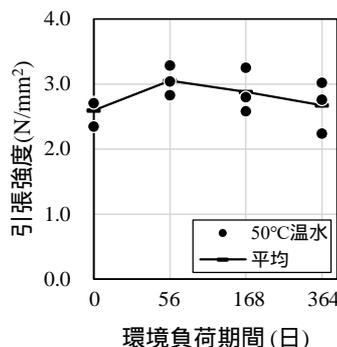


図 3 負荷期間と引張強度の関係

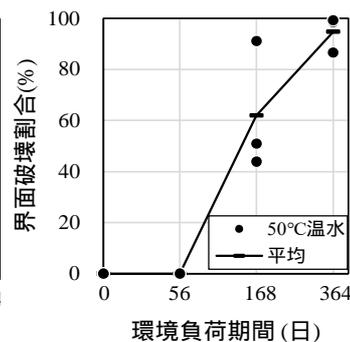


図 4 負荷期間と界面破壊割合の関係

引張強度に関して、負荷 56 日では養生効果による強度の増加がみられ、その後、温度及び水の影響により減少傾向となることが確認された。一方、破壊性状に関しては、負荷 56 日では材料破壊が支配的であったが、その後、界面破壊主体の破壊性状に移行した。ただし、強度低下と破壊性状の変化の間には、必ずしも相関性が明確にみられるわけではなく、両者に基づき評価することの重要性が示唆された。

また、接着剤接合部の劣化特性の評価を行う上で、負荷 56 日では養生効果のため環境負荷の影響を評価する上では期間が短いことが確認された。一方、負荷 364 日では 3 接着剤ともに試験体の多くが界面破壊に移行しており、接着剤間の性能の相対差も小さく負荷条件としては厳しいと考えられる。限られた環境負荷条件での試験結果であるが、168 日(約半年程度)の負荷期間は評価の一つの目安になるものと考えられる。

(2) 実環境暴露試験体の接着剤接合部の経年劣化傾向

接着剤 A について、図 5 に引張強度の経年変化と試験時温度の影響を示す。過年度の結果は文献による。図中には 20°C 時(環境負荷なし)の強度の平均値、標準偏差を示している。20°C

時の引張強度(平均値)に関して、13年目では、0.5年目から33%低下しており、温度変化等の継続的な環境作用が影響したものと考えられる。破壊位置はほぼSFRC側にわずかに入った部分である。図中には試験時温度毎の引張強度の関係も示すが、試験時温度が高温になるにつれて、引張強度は低下する傾向にある。すなわち、外観上材料破壊ではあるが、接合部の強度がSFRCと接着剤の混合部分に依存しており、接着剤の温度依存性が強度発現に影響を及ぼした可能性が示唆された。

(3) 環境促進試験による接着剤の強度・材料特性の変化傾向

3接着剤について、図6に接着剤樹脂試験片(13.8×13.8×40mmの直方体)の吸水率と圧縮強度比(負荷前に対する環境負荷後の圧縮強度の比率)と吸水率の関係を示す。気中乾燥後とは、168日後に温水から取り出して吸水率1%未満まで乾燥させた後の試験結果である。負荷期間とともに吸水率が増加する一方で、圧縮強度は低下しており、3接着剤ともに同様の傾向であった。また、温水とアルカリ温水による吸水率と強度の相違はみられなかった。図より吸水率に対し圧縮強度比は線形的に減少し、乾燥後には概ね負荷前の強度に回復している。すなわち、負荷後の強度低下の主な要因は接着剤内への水の浸入による樹脂の膨潤現象であると推察される。また、赤外分光分析においても、温水及びアルカリ温水負荷の前後において、接着剤の劣化の進行を示す特徴的な透過率の変化は確認できなかった。

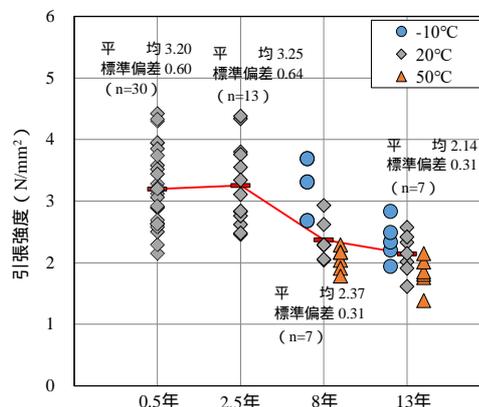


図5 引張強度の経年変化及び試験時温度の影響

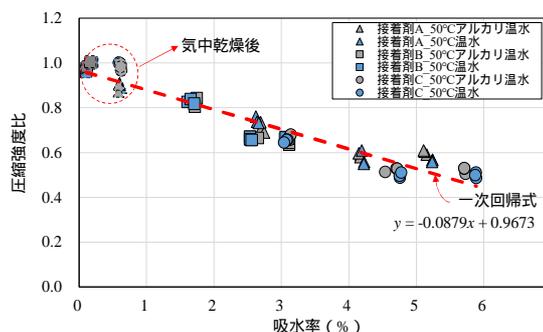


図6 圧縮強度比と吸水率の関係

(4) 環境促進試験体と暴露試験体の試験結果の関係

接着剤Aについて、環境促進試験での小型試験体(環境促進試験体)と暴露試験体の結果による劣化傾向を比較し、促進試験の環境負荷条件と実際の環境作用との関係について考察する。図7に環境促進試験体(50°C負荷)と暴露試験体での引張強度と鋼板面積割合の推移を比較して示す。なお、図中には負荷期間による変化傾向をわかりやすくするため、同一条件の試験値とその平均値を楕円で囲んで示している。環境促進試験での負荷168日の場合、強度の低下はほとんどみられなかった。一方、破壊性状は暴露試験体では外観上材料破壊が支配的であるのに対し、環境促進試験体では界面破壊に移行した。暴露試験体の場合、屋内保管の期間が長く、水の浸入の影響が小さかったが、環境促進試験体ではその影響が破壊性状として顕著に表れた可能性が考えられる。両者の結果の関連付けは難しいが、強度の低下傾向は対応している。すなわち、環境促進試験(50°C温水, 168日負荷)において、各接着剤の接合部の耐久性をある程度相対評価できる可能性があることが示唆された。

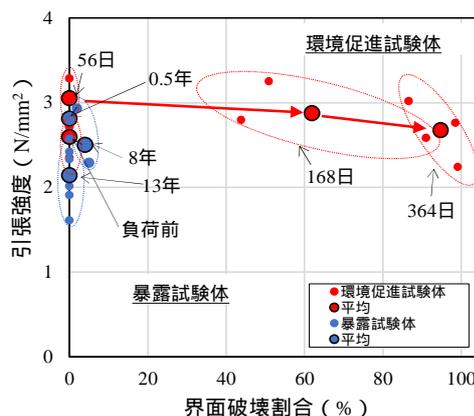


図7 暴露試験体と環境促進試験体による試験結果の関係

以上、限られた環境負荷条件下の試験結果であるが、SFRC舗装の接着剤接合部の耐久性を明らかにするとともに、SFRC舗装への接着剤の適用に関して、接着剤の性能評価試験の方法に関する基礎的知見が得られたと考える。

< 引用文献 >

(独)土木研究所, (株)横河ブリッジ, (株)NIPPO, 鹿島道路(株), 大成口テック(株): 鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究(その2・3・4)報告書 - SFRC舗装した既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル(案) - 土木研究所 共同研究報告書, No.395, 2009.10.
 佐藤歩, 佐々木寛幸, 村越潤, 小野秀一, 森猛: 鋼床版実大試験体上面に敷設したSFRC舗装接合面の引張強度の経年変化に関する調査, 第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.157-162, 2016.11.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 松本稔将, 村越潤, 堀井久一, 小野秀一	4. 巻 27
2. 論文標題 鋼床版SFRC舗装の接合に使用するエポキシ系接着剤の環境負荷後の材料特性に関する実験的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 77-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11273/jssc.27.105_77	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 MATSUMOTO Toshimasa, MURAKOSHI Jun, ONO Shuichi, TAKAHASHI Minoru, MORI Takeshi	4. 巻 76
2. 論文標題 EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR FATIGUE BEHAVIOR OF ADHESIVELY BONDED JOINT IN ORTHOTROPIC STEEL DECK OVERLAID WITH SFRC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))	6. 最初と最後の頁 11_72 ~ 11_83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.76.5_11_72	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------